

Analyzing the Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL) in Estimating Crop Evapotranspiration

Zahra Shirmohammadi-Aliakbarkhani* 

Corresponding Author, Assistant Prof., Dept. of Water Science, University of Torbat-e Jam, Torbat-e Jam, Iran.
E-mail: shirmohammadi@tjamcaas.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Full Paper

Article history:
Received: 05.07.2024
Revised: 08.12.2024
Accepted: 09.08.2024

Keywords:
Evapotranspiration,
Google Earth Engine,
Remote Sensing,
Sustainable agriculture,
Water Management

ABSTRACT

Background and Objectives: One of the key stages in water management involves accurately estimating water budget components. Proper estimations of the plant ET and water requirements of plants are very important for improving water management and increasing water consumption efficiency. Although ground-based ET measurement methods provide high-accuracy point measurements, regional ET maps are needed for monitoring water resources. In this regard, satellite ET estimation models such as SEBAL can be useful. Of course, the efficiency of this model is different in various climates and crops. Therefore, this study aims to calculate ET rates using the SEBAL model with Landsat 8 satellite imagery On the Google Earth Engine platform and assess the model's accuracy against FAO–Penman-Monteith method (ET₀) and crop evapotranspiration (ET_c).

Materials and Methods: This study was conducted in the Jangah area of Torbat-e Jam city, located in Razavi Khorasan province, from 2013 to 2023. A Java program was developed using the provided equations in Google Earth Engine for this algorithm. Daily evapotranspiration images were acquired for the study area, and evapotranspiration data were extracted using QGIS software. The prediction performance of the SEBAL model against the reference ET₀ and ET_c was evaluated using widely accepted statistical indices such as the correlation coefficient (CC), relative bias (RBIAS), root mean squared error (RMSE), and mean absolute error (MAE).

Results: Results revealed a strong correlation between the model and ET_c estimates ($R^2=0.85$). The model slightly overestimated daily total ET values by only 0.016 mm (positive bias). Validation of the model against ET_c indicated relatively minor errors, with daily mean absolute and root mean square errors of 0.76 mm and 0.97 mm, respectively.

Conclusion: The growing accessibility of open-access satellite data and advancements in remote sensing technologies are opening the door to systems capable of monitoring water usage by different stakeholders in near-real-time across various spatial scales. In this regard, satellite ET estimation models such as SEBAL can be useful. Of course, the efficiency of this model is different in various climates and crops. Based on the research findings, it was observed that the SEBAL method calculates actual evapotranspiration values with acceptable results. These results indicate that the use of this method can be suitable for the studied area. In summary,

the findings indicate that the SEBAL algorithm is a suitable approach for estimating crop evapotranspiration and can serve as an effective tool for water resource management in farms and other similar contexts.

Cite this article: Shirmohammadi-Aliakbarkhani, Zahra. 2024. Analyzing the Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL) in Estimating Crop Evapotranspiration. *Journal of Water and Soil Conservation*, 31 (3), 155-175.




© The Author(s).

DOI: 10.22069/jwsc.2024.22418.3729

Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

تجزیه و تحلیل الگوریتم تعادل انرژی سطحی برای زمین (SEBAL) در تخمین تبخیر و تعرق محصولات کشاورزی

زهرا شیرمحمدی - علی اکبر خانی* 

نویسنده مسئول، استادیار گروه مهندسی آب، مجتمع آموزش عالی تربت جام، تربت جام، ایران. رایانامه: shirmohammadi@tjamcaas.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله کامل علمی - پژوهشی	سابقه و هدف: یکی از مراحل اساسی در مدیریت منابع آب، تخمین دقیق پارامترهای بیلان آب است. برآورد صحیح تبخیر و تعرق و تعیین نیاز آبی گیاهان امری حیاتی برای بهبود مدیریت آب و افزایش کارایی مصرف آب است. اگرچه روش‌های اندازه‌گیری تبخیر و تعرق با استفاده از داده‌های ایستگاه‌های زمینی، اندازه‌گیری‌های نقطه‌ای تبخیر و تعرق را با دقت بالا ارائه می‌دهند؛ اما نیاز به نقشه‌های تبخیر و تعرق منطقه‌ای برای پیش‌بینی منابع آب احساس می‌شود. در این راستا، مدل‌های تخمین تبخیر و تعرق ماهواره‌ای مانند SEBAL می‌تواند مفید واقع شود. البته کارایی این مدل در اقلیم‌ها و محصولات مختلف متفاوت است؛ بنابراین، هدف این مطالعه محاسبه تبخیر و تعرق با استفاده از مدل SEBAL با تصاویر ماهواره‌ای Landsat 8 در پلتفرم گوگل ارث انجین و ارزیابی دقت مدل در برابر روش FAO-Penman-Monteith (ET _o) و تبخیر و تعرق پوشش گیاهی (ET _c) است.
تاریخ دریافت: ۰۳/۰۲/۱۸ تاریخ ویرایش: ۰۳/۰۵/۲۲ تاریخ پذیرش: ۰۳/۰۶/۱۸	مواد و روش‌ها: این مطالعه در منطقه جنگاه شهرستان تربت جام واقع در استان خراسان رضوی در بازه زمانی بین سال‌های ۲۰۱۳ تا ۲۰۲۲ انجام شد. برای این مطالعه، الگوریتم محاسباتی با استفاده از معادلات مربوطه به زبان جاوا در گوگل ارث انجین نوشته شد و تصاویر روزانه تبخیر و تعرق برای منطقه مورد مطالعه دریافت گردید. سپس تبخیر و تعرق روزانه برای منطقه مورد نظر با استفاده از نرم‌افزار QGIS استخراج گردید. به منظور ارزیابی دقت مدل سبال در برابر تبخیر و تعرق گیاه مرجع و تبخیر و تعرق پوشش گیاهی به روش پنمن مونتیث فائو از شاخص‌های آماری مانند ضریب همبستگی (CC)، بایاس نسبی (RBIAS)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و میانگین خطای مطلق (MAE) استفاده گردید.
واژه‌های کلیدی: تبخیر و تعرق، سنجش از دور، کشاورزی پایدار، گوگل ارث انجین، مدیریت آب	یافته‌ها: نتایج نشان دادند که مدل سبال دارای همبستگی قوی با تبخیر و تعرق پوشش گیاهی منطقه است ($R^2=0/85$). این مدل مقادیر تبخیر و تعرق روزانه پوشش گیاهی منطقه را با میزان اندکی بایاس مثبت تخمین زد (۰/۰۱۶ میلی‌متر). اعتبارسنجی مدل در مقابل تبخیر و تعرق

پوشش گیاهی خطاهای نسبتاً جزئی را نشان داده و مقادیر میانگین مطلق خطا و ریشه میانگین مربعات خطا به ترتیب $0/76$ میلی‌متر و $0/97$ میلی‌متر در روز بوده است.

نتیجه‌گیری: افزایش دسترسی به داده‌های ماهواره‌ای و پیشرفت‌های اخیر در تکنیک‌های سنجش از دور، زمینه را برای توسعه سیستم‌هایی فراهم کرده است که می‌توانند مصرف آب توسط ذینفعان مختلف را در مقیاس‌های مکانی گوناگون و به‌صورت تقریباً آنی پایش کنند. در این راستا، مدل‌های تخمین تبخیر و تعرق ماهواره‌ای مانند SEBAL می‌توانند مفید باشند. البته، کارایی این مدل در اقلیم‌ها و محصولات مختلف متفاوت است. با توجه به نتایج پژوهش، مشاهده شد که روش SEBAL مقادیر واقعی تبخیر و تعرق را با نتایج قابل قبول محاسبه می‌کند. این نتایج نشان می‌دهد که استفاده از این روش می‌تواند در منطقه مورد مطالعه مناسب باشد. به‌طور خلاصه، یافته‌ها نشان می‌دهد که الگوریتم SEBAL یک رویکرد مناسب برای تخمین تبخیر و تعرق محصول است و می‌تواند به‌عنوان یک ابزار مؤثر برای مدیریت منابع آب در مزارع و سایر زمینه‌های مشابه عمل کند.

استناد: شیرمحمدی- علی‌اکبرخانی، زهرا (۱۴۰۳). تجزیه و تحلیل الگوریتم تعادل انرژی سطحی برای زمین (SEBAL) در تخمین تبخیر و تعرق محصولات کشاورزی. پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، ۳۱ (۳)، ۱۷۵-۱۵۵.

DOI: 10.22069/jwsc.2024.22418.3729



© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

مقدمه

در یک پژوهش، راوات و همکاران (۲۰۱۷) به تخمین تبخیر-تعرق واقعی محصول گندم با استفاده از الگوریتم SEBAL و روش استاندارد شده پنمن مونیتث در منطقه بیوانی در هاریانا پرداختند. نتایج نشان داد که الگوریتم SEBAL پتانسیل خوبی برای برآورد تبخیر-تعرق در منطقه مورد مطالعه دارد (۵). همچنین، اوچن و یاکی (۲۰۲۲) مطالعه‌ای به منظور محاسبه تبخیر-تعرق توسط مدل SEBAL با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست ۵ و ۸ و تعیین دقت مدل در برابر مشاهدات زمینی در اطراف دریاچه ینیکاگا در بولو، ترکیه بین سال‌های ۲۰۱۰ و ۲۰۱۴ انجام دادند نتایج نشان داد که ارتباط قوی بین مدل و داده‌های زمینی وجود دارد و مدل تبخیر و تعرق روزانه را بیش از حد برآورد کرد (۶). شاملو و همکاران (۲۰۲۱) در پژوهشی که با هدف ارزیابی اثربخشی الگوریتم تعادل انرژی سطحی برای زمین (SEBAL) در تخمین تبخیر و تعرق و ضریب گیاهی ذرت در منطقه مدیترانه‌ای استان آدانا، ترکیه انجام دادند به این نتیجه رسیدند که مقادیر تبخیر و تعرق تولید شده SEBAL با روش پنمن مونیتث فائو مطابقت بالایی دارد. نتایج آن‌ها نشان داد که عملکرد الگوریتم SEBAL در تخمین تبخیر و تعرق واقعی و ضریب محصول با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ قابل قبول است (۷). درو (۲۰۲۳) برای اعتبارسنجی نتایج حاصل از الگوریتم SEBAL، از روش‌های پنمن مونیتث فائو برای محاسبه مقادیر تبخیر و تعرق در هند استفاده کرد نتایج نشان داد که مقادیر تبخیر و تعرق تولید شده SEBAL مطابقت بالایی با روش پنمن مونیتث فائو دارد که بالاترین مقدار همبستگی ($R^2=0.826$) را به دست آورد (۸). ویسته لندرو مونکادا و همکاران (۲۰۲۱) به منظور مقایسه تبخیر و تعرق پنبه برآورد شده با مدل SEBAL و روش پنمن مونیتث فائو، در طول چرخه فنولوژیکی

با افزایش سریع جمعیت انسانی، نیاز به غذا و آب نیز افزایش می‌یابد. برای تأمین این نیازها، لازم است تولیدات کشاورزی افزایش یابد. گسترش اراضی زراعی و افزایش مساحت‌های آبیاری، فشار زیادی روی منابع آب زیرزمینی و سطحی ایجاد می‌کند. در کشور ما، مصرف بی‌اندازه و بدون آگاهی از منابع آبی در مناطق کشاورزی منجر به کاهش حجم آب‌های زیرزمینی و سطحی شده است (۱). علاوه بر این، خشک‌سالی کشاورزی، تهدید جدی‌ای برای کشاورزی، امنیت غذایی و اقتصاد است؛ بنابراین، مدیریت و استفاده بهینه از منابع آب نسبت به گذشته بسیار حیاتی شده است. یکی از مراحل مهم در مدیریت آب، محاسبه دقیق بیلان آب است. بیلان آب، معادله پیوستگی است که جریان آب ورودی و خروجی از یک سیستم سطحی یا آب‌زیرزمینی تعریف شده در یک بازه زمانی مشخص را همراه با تغییرات ذخیره‌سازی در نظر می‌گیرد. مهم‌ترین پارامتر در دست رفتن آب و محاسبات بیلان آب پس از بارش، بدون شک تبخیر-تعرق واقعی (ET) است. تبخیر-تعرق مجموع آبی است که از گیاهان از طریق تعرق و از سطح خاک از طریق تبخیر تلف می‌شود (۲). بررسی مقدار تبخیر و تعرق ET به صورت عملیاتی برای اطمینان از استفاده پایدار از منابع آب، ردیابی مصرف آب کشاورزی، مدیریت منابع آب‌زیرزمینی و سطحی، بیلان آب و انرژی، مانیتورینگ تبادل انرژی بین جو و سطح زمین و شناسایی مناطقی که آبیاری بیش از حد انجام می‌شود، بسیار حیاتی است. روش‌ها و تکنیک‌های متعددی برای تعیین مقدار تبخیر و تعرق (ET) پیشنهاد شده‌اند که مهم‌ترین آن‌ها اندازه‌گیری مستقیم با لایسیمتر، روش‌های مبتنی بر داده‌های هواشناسی و تکنیک‌های مبتنی بر سنجش از دور (RS) است (۳، ۴).

شده از لایسیمتر، در دو منطقه مطالعاتی تبریز و کرج در سه سال زراعی ۲۰۱۷ تا پایان سال زراعی ۲۰۲۰ پرداختند. نتایج با استفاده از پارامترهای آماری نشان داد که در دو منطقه مزبور، نتایج به نسبت خوب بودند، ولی مقدار تبخیر-تعرق واقعی برآورد شده توسط سبال در بیش‌تر موارد، بیش از مقدار تبخیر-تعرق اندازه‌گیری شده توسط لایسیمتر بود (۱۴). کامیاب و همکاران (۲۰۲۲) از الگوریتم سبال و الگوریتم شار تبخیر و تعرق با استفاده از سامانه گوگل ارث‌انجین برای تعیین تبخیر و تعرق واقعی ذرت در دشت اراک استفاده کردند. نتایج نشان داد که ETa در ابتدای فصل رشد کم بوده و سپس در اواسط فصل رشد شروع به افزایش نموده و سپس به دلیل کاهش دما و همچنین تغییرات پوشش ذرت، کاهش یافته است. الگوریتم EEFLux حدود ۷/۷۱ درصد تبخیر-تعرق روزانه را بیش‌تر از الگوریتم SEBAL در مزرعه ذرت اراک برآورد کرده است (۱۵).

اگرچه روش‌های اندازه‌گیری تبخیر-تعرق مبتنی بر داده‌های زمینی نقطه‌ای از دقت بالایی برخوردار می‌باشند، اما تبخیر-تعرق (ET) به دلیل تنوع مکانی گسترده بارش، ویژگی‌های هیدرولیکی خاک و نوع و تراکم پوشش گیاهی در معرض تغییرات سریع زمانی و مکانی است؛ بنابراین، تقریباً غیرممکن است که توزیع مکانی و زمانی آن را برای مناطق بزرگ تنها از طریق اندازه‌گیری‌های زمینی تعیین کنیم. همچنین، نقشه‌های منطقه‌ای تبخیر-تعرق برای مانیتورینگ منابع آب لازم است. اندازه‌گیری نقشه‌های تبخیر-تعرق در سطح دهستان، شهرستان یا استان تنها از طریق داده‌های شناسایی از راه دور و تکنیک‌های پردازش تصویر ممکن است (۱۶). داده‌های زمینی برای تأیید این نقشه‌های مبتنی بر ماهواره استفاده می‌شوند؛ بنابراین، انواع مختلفی از روش‌های مبتنی بر شناسایی از راه دور برای برآورد تبخیر-تعرق

گیاه در هشت مزرعه واقع ایالت ماتو گروسو - برزیل پژوهشی انجام دادند. نتایج همبستگی قوی بین دو روش نشان داد (۹).

در ایران، نصرتی و همکاران (۲۰۱۵) روش اصلاح‌شده سبال را در منطقه کوهستانی طالقان با استفاده از تصاویر مودیس در سال ۲۰۰۶ مورد بررسی قرار دادند. نتایج حاصل از مدل سبال و داده‌های لایسمتری همبستگی خوبی را در این منطقه نشان داد (۱۰). هم‌چنین، کرباسی و همکاران (۲۰۱۶) به بررسی الگوریتم سبال در تعیین تبخیر و تعرق مزارع ذرت و یونجه در شهرستان خرم‌دره با استفاده از تصاویر ماهواره لندست ۸ و مقایسه آن با روش پنمن مونیتث فائو پرداختند. نتایج نشان داد که در این منطقه دو مدل مطابقت نسبتاً خوبی باهم دارند (۱۱). گوشه‌گیر و همکاران (۲۰۱۸) پژوهشی را به منظور تعیین میزان تبخیر و تعرق واقعی نیشکر در کشت و صنعت نیشکر امیرکبیر با استفاده از الگوریتم سبال و تصاویر ماهواره‌های لندست ۸ و مودیس انجام دادند. آن‌ها نتایج را با مقادیر حاصل از لایسیمتر مقایسه کردند. میزان میانگین مطلق خطا میان تبخیر و تعرق واقعی با استفاده از روش تلفیق تصاویر و لایسیمتر، به میانگین ۰/۵۵ میلی‌متر در روز رسید و در سطح پنج درصد تفاوت معناداری بین دو روش سنجش‌از‌دور مشاهده نشد (۱۲). رحیمی و همکاران (۲۰۱۵) در پژوهشی به بررسی صحت برآورد واقعی تبخیر-تعرق با استفاده از الگوریتم SEBAL در مقایسه با مقادیر محاسبه‌شده توسط پنمن مونیتث فائو در حوضه آبریز تجن و منطقه شرکت کشاورزی ساری دشت ناز پرداختند. نتایج نشان داد که تبخیر و تعرق ساعتی و روزانه را می‌توان با دقت قابل‌قبولی تخمین زد (۱۳).

مرشدی و همکاران (۲۰۲۲) در پژوهشی، به برآورد تبخیر-تعرق واقعی گیاه گندم با استفاده از الگوریتم سبال و مقایسه آن با داده‌های اندازه‌گیری

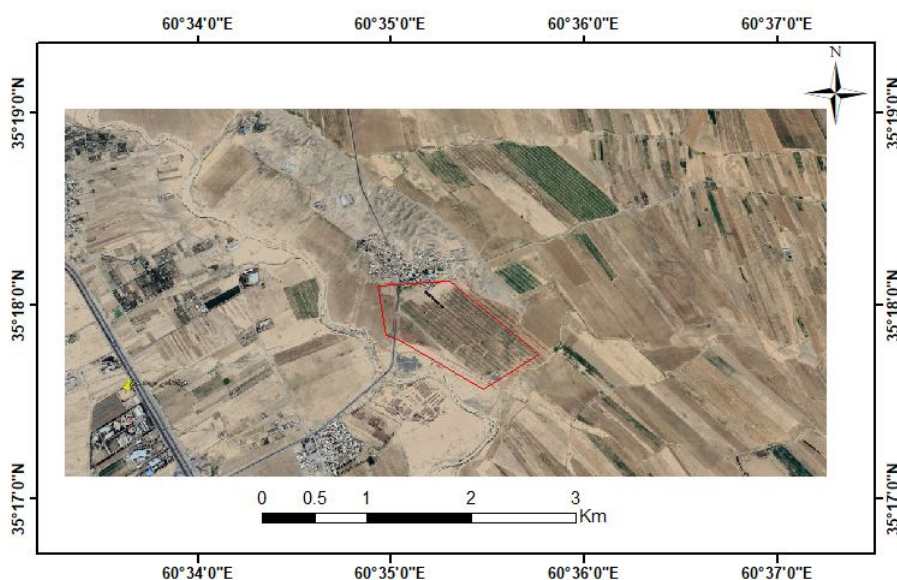
تاکنون پژوهش‌های کافی در مورد کارایی الگوریتم‌های تبخیر و تعرق مبتنی بر سنجش از دور در این منطقه انجام نشده است؛ بنابراین، هدف اصلی این پژوهش استفاده از الگوریتم سبال با استفاده از پلتفرم Google Earth Engine در تخمین تبخیر و تعرق واقعی برای تاریخ‌های خاص در منطقه جنگاه با استفاده از تصاویر لندست ۸ و مقایسه نتایج آن با تبخیر و تعرق گیاهان کاشته شده در تاریخ‌های مورد نظر با استفاده از روش پنمن مونتیت فائو و ضریب گیاهی است.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه: این پژوهش در اراضی جنگاه شهرستان تربت‌جام استان خراسان رضوی واقع در $35^{\circ}17'00''$ عرض جغرافیایی شمالی و $60^{\circ}34'00''$ طول جغرافیایی شرقی انجام گرفت (شکل ۱).

توسعه یافته‌اند (۱۷، ۱۸). همچنین، با استفاده از تکنیک مبتنی بر سنجش از دور، تبخیر و تعرق یک منطقه را می‌توان با دقت بالا بدون نیاز به دانستن هیچ‌گونه پیشینه‌ای از وضعیت خاک، محصول و مدیریت مزرعه تخمین زد (۱۹).

تخمین تبخیر-تعرق واقعی (ETA) به‌عنوان یکی از دشوارترین و مشکل‌ترین مسائل در چرخه هیدرولوژیک با بسیاری از عوامل محیطی و اقلیمی مشخص می‌شود، هم‌چنین عملیات میدانی برای اندازه‌گیری تبخیر-تعرق واقعی بسیار گران‌قیمت و زمان‌بر است؛ بنابراین، در این مطالعه، امکان استفاده از الگوریتم سبال در تعیین مقدار تبخیر-تعرق واقعی در مزارع روستای جنگاه تربت‌جام مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به بررسی پژوهش‌های گذشته، الگوریتم‌های مبتنی بر سنجش از دور برای تخمین ETA کارایی متفاوتی در شرایط کشاورزی و محیط‌زیست مختلف دارند (۱۵، ۲۰). علاوه بر این،

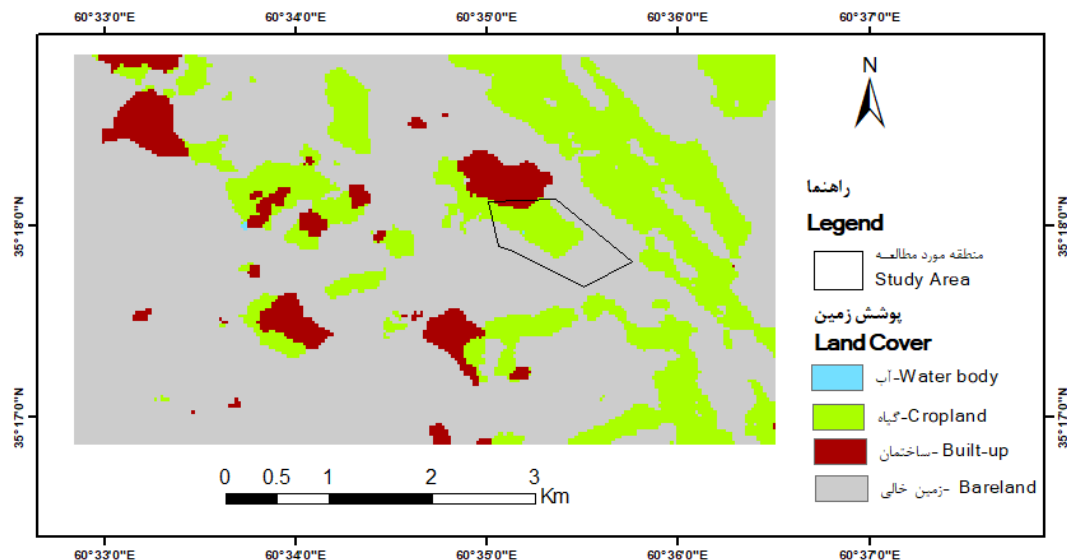


شکل ۱- نمایی از منطقه مورد مطالعه در دشت تربت‌جام استان خراسان رضوی.

Figure 1. A view of the studied area in Torbat Jam Plain, Razavi Khorasan Province.

به ایستگاه‌های زمینی می‌باشد زیرا از تلفیق داده‌های ماهواره‌ای و ایستگاه‌های زمینی به‌دست آمده‌اند. برای محاسبه تبخیر و تعرق گیاه مرجع در لحظه تصویربرداری مورد استفاده در الگوریتم سبال، از محصول داده تبخیر و تعرق گیاه مرجع روزانه فائو با کد "ee. ImageCollection ("FAO/WAPOR/2/L1_RET_E")" استفاده شد. همچنین برای کاربری اراضی از محصول داده‌های کاربری اراضی در این پلتفرم استفاده شد. در ابتدا برای سال‌های ۲۰۱۳ تا ۲۰۱۵ از محصول داده کاربری اراضی سالانه مودیس با کد "ee. ImageCollection ("MODIS/061/MCD12Q1")" و سپس از سال ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۳ از محصول داده ماهانه ماهواره‌ای سنتیل در این پلتفرم با کدهای "ee. ImageCollection ("GOOGLE/DYNAMICWORLD/V1")" استفاده گردید. در شکل ۲ نقشه پوشش گیاهی منطقه مورد مطالعه در تاریخ ۲۰۱۹/۹/۷ نشان داده شده است.

در این پژوهش از تصاویر ماهواره لندست ۸ در ۱۴۵ روز در طول سال‌های ۲۰۱۳ تا ۲۰۲۲ در پلتفرم گوگل ارث‌انجین استفاده شد. انتخاب تصاویر ماهواره لندست ۸ به دلیل رایگان بودن، قدرت تفکیک مکانی و طیفی مناسب و کاربری آسان انجام شد. زمان برداشت تصاویر به وقت محلی ایران ساعت ۱۱:۰۰ بوده است. تصاویری با درصد ابر کم‌تر از ۱۰ درصد برای این پژوهش مورد استفاده قرار گرفتند. برای داده‌های ارتفاعی از تصاویر DEM 30 متری SRTM ناسا با کد "ee. Image ("USGS/SRTMGL1_003")" استفاده شد. درجه حرارت روزانه و چگالی سطح زمین از محصول داده تلفیقی ER5 با کد "ee. ImageCollection ("ECMWF/ERA5_LAND/DAILY_AGGR")" استخراج شد. سرعت باد نیز با استفاده از محصول داده تلفیقی GLDAS با کد "ee. ImageCollection ("NASA/GLDAS/V021/NOAH/G025/T3H")" برای زمان و تاریخ‌های مورد نظر استخراج شد. مزیت داده‌های تلفیقی در دقت بالاتر نسبت



شکل ۲- نقشه پوشش گیاهی منطقه مورد مطالعه در تاریخ ۲۰۱۹/۹/۷.
Figure 2. Map of Land cover on study area on 9/7/2019.

از آنجاکه تصاویر ماهواره‌ای اطلاعاتی در زمان گذر ماهواره ارائه می‌نمایند بنابراین الگوریتم سبال مقدار تبخیر و تعرق لحظه‌ای را در زمان برداشت تصویر برآورد می‌نماید. شار گرمای نهان برای هر پیکسل تصویر، به صورت باقی‌مانده معادله توازن انرژی سطحی (رابطه ۳) محاسبه می‌شود (۲۲).

$$\lambda ET = R_n - G - H \quad (3)$$

در این رابطه، λET شار گرمای نهان (W/m^2)، R_n شار تابش خالص در سطح زمین (W/m^2)، G شار حرارتی خاک (W/m^2) و H شار گرمای محسوس (W/m^2) می‌باشد.

تابش خالص (R_n): اولین مرحله در روش SEBAL محاسبه شار خالص تابش سطح (R_n) با استفاده از معادله بیلان تابش سطحی است:

$$R_n = R_{S\downarrow} - \alpha R_{S\downarrow} + R_{L\downarrow} - R_{L\uparrow} - (1 - \epsilon_0)R_{L\downarrow} \quad (4)$$

که در آن، α آلبدوی سطحی (dimensionless)، $R_{S\downarrow}$ تابش ورودی طول‌موج کوتاه (W/m^2)، $R_{L\downarrow}$ تابش ورودی طول‌موج بلند (W/m^2)، $R_{L\uparrow}$ تابش خروجی طول‌موج بلند (W/m^2)، ϵ_0 گیسلمندی سطحی (dimensionless) می‌باشد.

تابش ورودی طول‌موج کوتاه ($R_{S\downarrow}$): تابش ورودی طول‌موج کوتاه از رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$R_{S\downarrow} = G_{sc} \times \cos \theta \times d_r \times \tau_{sw} \quad (5)$$

که در آن، G_{sc} ثابت خورشیدی ($1367 W/m^2$)، θ زاویه سمت الرأس خورشیدی یا زاویه ورودی تابش خورشیدی، d_r معکوس مربع فاصله نسبی زمین تا خورشید (رابطه ۶)، τ_{sw} شفافیت جوی (رابطه ۷) و J شماره روز ژولینوسی، Z ارتفاع منطقه از سطح دریا (m) می‌باشد.

روش‌های محاسبه تبخیر و تعرق

روش تبخیر و تعرق پنمن مونتیت فائو^۱: به دلیل عدم وجود داده‌های معتبر لایسیمتر برای مقایسه نتایج الگوریتم سبال با آن در منطقه یادشده از روش تبخیر و تعرق پنمن مونتیت فائو به‌عنوان روشی استاندارد در محاسبه تبخیر و تعرق مرجع که مورد تأیید بسیاری از پژوهش‌گران می‌باشد، استفاده گردید. این روش معادله‌ای برای محاسبه تبخیر و تعرق گیاه مرجع به صورت رابطه ۱ ارائه می‌دهد (۲۱).

$$ET_o = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (1)$$

که در آن، ET_o تبخیر و تعرق گیاه مرجع به روش پنمن مونتیت فائو ($mm \ day^{-1}$)، Δ شیب منحنی فشار بخار آب نسبت به دما ($kPa \ ^\circ C^{-1}$)، R_n تابش خالص ورودی به سطح گیاه ($MJ \ m^{-2} \ day^{-1}$)، G شار گرمای خاک ($MJ \ m^{-2} \ day^{-1}$)، T میانگین روزانه دمای هوا در ارتفاع دو متری ($^\circ C$)، u_2 سرعت باد در ارتفاع دو متری ($m \ s^{-1}$)، e_s و e_a به ترتیب فشار بخار اشباع و واقعی هوا (kPa)، γ ثابت سایکرومتری ($kPa \ ^\circ C^{-1}$) می‌باشد. که با استفاده از رابطه ۲ تبخیر و تعرق گیاه مرجع به تبخیر و تعرق پوشش گیاهی منطقه مورد مطالعه تبدیل می‌گردد:

$$ET_c = ET_o \times K_c \quad (2)$$

در این رابطه، ET_c تبخیر و تعرق پوشش گیاهی به روش پنمن مونتیت فائو ($mm \ day^{-1}$)، K_c ضریب گیاهی می‌باشد.

الگوریتم توازن انرژی سطح برای (سبال): مدل سبال، مقدار تبخیر-تعرق را با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و حداقل داده‌های زمینی مورد نیاز و بر اساس معادله توازن انرژی محاسبه می‌نماید.

1- FAO Penman-Monteith

شار گرمای محسوس (H): شار گرمای محسوس میزان اتلاف گرما به هوا توسط همرفت و رسانش به دلیل اختلاف دما است. برای انتقال حرارت با استفاده از معادله زیر محاسبه می‌شود:

$$H = \frac{\rho \times c_p \times dT}{r_{ah}} \quad (12)$$

که در آن، ρ چگالی هوا (kg/m^3)، c_p گرمای ویژه هوا (1004 J/kg/K)، r_{ah} مقاومت آئرو دینامیکی در برابر انتقال گرما (s/m) می‌باشد. dT اختلاف دما بین دو ارتفاع (z_1 و z_2) (K) است.

شار گرمای محسوس (H) تابعی از گرادپان دما، زبری سطح و سرعت باد است. حل رابطه ۱۲ به دلیل وجود دو مجهول r_{ah} و dT دشوار است. برای برآورد شار گرمای محسوس (H) در روش سبال، ابتدا باید دو پیکسل آستانه را به عنوان پیکسل‌های سرد و گرم انتخاب کرد. پیکسل سرد نماینده قسمتی از منطقه مورد مطالعه است که پوشیده از گیاه بوده و خوب آبیاری شده و یا سطح مرطوب دارد. پیکسل گرم نماینده قسمتی از منطقه مورد مطالعه است که بدون پوشش گیاهی و خاک لخت است. برای تسهیل این محاسبات، مقادیر اختلاف دما در این دو پیکسل و سرعت باد در یک ارتفاع معین استفاده می‌شود. در این مطالعه، با استفاده از نمودار دمای سطح زمین و شاخص NDVI در منطقه مورد مطالعه در تاریخ‌های مورد نظر، مقادیر دمای سطح زمین و شاخص NDVI برای پیکسل‌های گرم (دمای بالاتر و شاخص NDVI کم‌تر) و پیکسل‌های سرد (دمای پایین‌تر و شاخص NDVI بالاتر) به صورت دستی انتخاب شدند. سپس از این مقادیر برای محاسبه اختلاف دما (dT) و اصلاح مقادیر استفاده شد.

$$d_r = 1 + 0.033 \cos \left(J \frac{2\pi}{365} \right) \quad (6)$$

$$\tau_{sw} = 0.75 + 2 \times 10^{-5} \times z \quad (7)$$

تابش طول موج بلند ورودی، با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$R_{L\downarrow} = \varepsilon_a \times \sigma \times T_a^4 \quad (8)$$

$$\varepsilon_a = 0.85 \times (-\ln \tau_{sw})^{0.09} \quad (9)$$

در این رابطه‌ها، ε_a گسیلمندی اتمسفر (dimensionless)، ثابت استفان-بولتزمن ($\text{W/m}^2/\text{K}^4$) 5.67×10^{-8} ، T_a دمای نزدیک سطح زمین (K) است. تابش طول موج بلند خروجی، با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

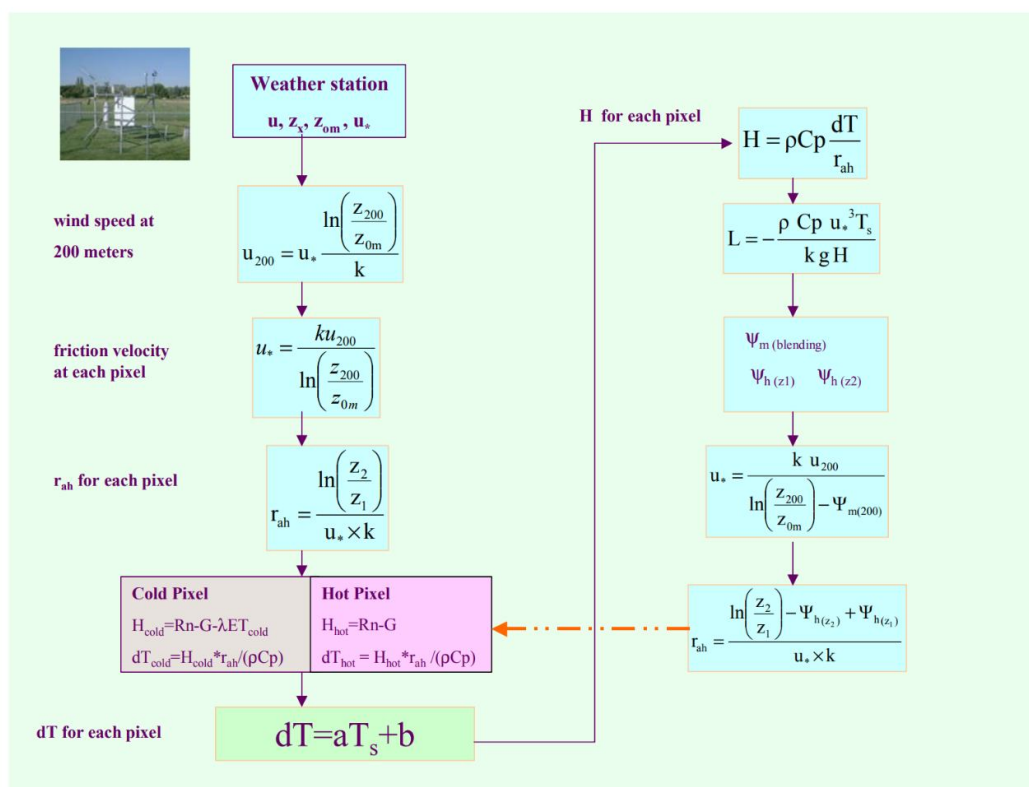
$$R_{L\uparrow} = \varepsilon_0 \times \sigma \times T_s^4 \quad (10)$$

که در آن، ε_0 گسیلمندی سطحی عریض باند (dimensionless)، ثابت استفان-بولتزمن ($\text{W/m}^2/\text{K}^4$) 5.67×10^{-8} ، T_s دمای سطح زمین (K) است.

شار حرارتی خاک (G): شار حرارتی خاک میزان حرارت ذخیره شده در خاک و پوشش گیاهی به دلیل هدایت مولکولی است. در روش سبال برای محاسبه شار حرارتی خاک از روش تجربی زیر که توسط باستیانسن (۲۰۰۰) ارائه شده و نشانگر مقادیر نزدیک به ظاهر است استفاده می‌شود. سپس با داشتن مقادیر محاسبه شده R_n (رابطه ۴) مقدار شار حرارتی خاک محاسبه می‌گردد (۲۲).

$$\frac{G}{R_n} = \frac{T_s}{\alpha} (0.0038\alpha + 0.0074\alpha^2)(1 - 0.98\text{NDVI}^4) \quad (11)$$

که در آن، T_s دمای سطح زمین ($^{\circ}\text{C}$)، α آلبدوی سطحی (dimensionless)، شاخص NDVI (شاخص تفاضل نرمال شده پوشش گیاهی) می‌باشد.



شکل ۳- فلوچارت فرایند تکراری برای محاسبه گرمای محسوس (H) (۲۳).

Figure 3. Flow Chart of the Iterative Process for the Calculation of Sensible Heat (H).

$$ETrF = \frac{ET_{inst}}{ET_r} \quad (14)$$

که در آن، ET_r تبخیر و تعرق گیاه مرجع در زمان تصویر ($mmhr^{-1}$) می‌باشد. سپس با استفاده از تبخیر و تعرق گیاه مرجع به کمک رابطه ۱۵، مقادیر تبخیر و تعرق روزانه تعیین می‌شود. در این پژوهش، برای محاسبه تبخیر و تعرق گیاه مرجع در لحظه تصویر، از محصول داده ماهواره‌ای فائو استفاده شده است.

$$ET_{24} = ETrF \times ET_{r-24} \quad (15)$$

این الگوریتم به زبان جاوا در پلتفرم گوگل ارث‌انجین نوشته شده است و تصاویر روزانه برای منطقه مورد مطالعه از این پلتفرم دریافت شده است. سپس داده‌های تبخیر و تعرق برای منطقه مورد نظر با

پس از آن که مقدار شار گرمای محسوس بر اساس شرایط جوی تصحیح گردید مقدار لحظه‌ای شار گرمای نهان تبخیر مطابق با رابطه ۳ برای هر پیکسل محاسبه شده، سپس با استفاده از رابطه زیر مقدار لحظه‌ای تبخیر-تعرق واقعی ET_{inst} محاسبه می‌گردد.

$$ET_{inst} = 3600 \frac{\lambda ET}{\lambda} \quad (13)$$

که در آن، ET_{inst} تبخیر و تعرق لحظه‌ای ($mmhr^{-1}$)، λ گرمای نهان تبخیر یا گرمای جذب شده هنگام تبخیر یک کیلوگرم آب (J/kg) است.

تبخیر و تعرق روزانه: با توجه به اهمیت مقدار تبخیر و تعرق روزانه در برنامه‌ریزی منابع آب، مقادیر لحظه‌ای تبخیر و تعرق که توسط روش سبال محاسبه شده‌اند، ابتدا توسط رابطه ۱۴ به مقادیر تبخیر و تعرق لحظه‌ای مرجع تبدیل می‌شوند:

استفاده از نرم‌افزار QGIS استخراج شده است. در جدول زیر تاریخ‌هایی که تصاویر مربوط به آن‌ها دریافت شده‌اند کدگذاری شده‌اند و این کدها برای ترسیم نمودارها استفاده شده‌اند.

جدول ۱- کدگذاری روزهای برداشت تصاویر تبخیر و تعرق سبال.

Table 1. Coding of the days of collection of Sabal evapotranspiration images.

تاریخ Date	کد Code	تاریخ Date	کد Code	تاریخ Date	کد Code	تاریخ Date	کد Code	تاریخ Date	کد Code	تاریخ Date	کد Code
11/8/21	121	29/1/20	97	16/6/18	73	13/8/16	49	15/1/15	25	17/5/13	1
27/8/21	122	14/2/20	98	2/7/18	74	29/8/16	50	31/1/15	26	18/6/13	2
12/9/21	123	1/3/20	99	18/7/18	75	14/9/16	51	5/4/15	27	4/7/13	3
28/9/21	124	18/4/20	100	3/8/18	76	16/10/16	52	21/4/15	28	7/13	4
14/10/21	125	4/5/20	101	19/8/18	77	1/11/16	53	7/5/15	29	5/8/13	5
30/10/21	126	5/6/20	102	4/9/18	78	5/2/17	54	23/5/15	30	21/8/13	6
15/1/21	127	21/6/20	103	9/18	79	9/3/17	55	24/6/15	31	24/10/13	7
1/12/21	128	23/7/20	104	6/10/18	80	12/5/17	56	10/7/15	32	11/12/13	8
17/12/21	129	8/8/20	105	22/10/18	81	28/5/17	57	26/7/15	33	28/1/14	9
3/2/22	130	24/8/20	106	9/12/18	82	13/6/17	58	11/8/15	34	13/2/14	10
19/2/22	131	9/9/20	107	25/12/18	83	29/6/17	59	27/8/15	35	17/3/14	11
24/4/22	132	25/9/20	108	27/2/19	84	15/7/17	60	12/9/15	36	18/4/14	12
26/5/22	133	11/10/20	109	31/3/19	85	31/7/17	61	14/10/15	37	4/5/14	13
11/6/22	134	27/10/20	110	2/5/19	86	16/8/17	62	30/10/15	38	21/6/14	14
27/6/22	135	14/12/20	111	19/6/19	87	1/9/17	63	15/11/15	39	7/7/14	15
13/7/22	136	31/1/21	112	5/7/19	88	17/9/17	64	1/12/15	40	23/7/14	16
14/8/22	137	16/2/21	113	21/7/19	89	3/10/17	65	18/1/16	41	8/8/14	17
30/8/22	138	4/3/21	114	6/8/19	90	19/10/17	66	19/2/16	42	24/8/14	18
15/9/22	139	5/4/21	115	22/8/19	91	4/11/17	67	6/3/16	43	9/9/14	19
1/10/22	140	23/5/23	116	7/9/19	92	20/11/17	68	25/5/16	44	25/9/14	20
17/10/22	141	8/6/21	117	23/9/19	93	6/12/17	69	10/6/16	45	11/10/14	21
20/12/22	142	24/6/21	118	9/10/19	94	28/3/18	70	26/6/16	46	12/11/14	22
21/1/23	143	10/7/21	119	25/10/19	95	29/4/18	71	12/7/16	47	14/12/14	23
22/2/23	144	26/7/21	120	28/12/19	96	31/5/18	72	28/7/16	48	30/12/14	24

بایاس نسبی (RBIAS): این شاخص نشان می‌دهد که مدل چقدر به‌طور میانگین از مقادیر مشاهداتی کم‌تر یا بیش‌تر پیش‌بینی می‌کند. اگر بایاس نسبی صفر باشد، نشان‌دهنده پیش‌بینی صحیح مدل است.

ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE): این شاخص میزان اختلاف میان مقادیر مدل و مشاهدات را نشان می‌دهد. مقدار کم‌تر ریشه میانگین مربعات خطا نشان‌دهنده دقت بالاتر مدل است.

آنالیزهای آماری: برای ارزیابی و مقایسه روش‌های تبخیر و تعرق واقعی با استفاده از الگوریتم سبال و روش پنمن مونیتث فائو، از شاخص‌های آماری زیر استفاده شده است:

ضریب همبستگی (CC): این شاخص نشان می‌دهد که چقدر مقادیر تبخیر و تعرق مدل‌سازی شده توسط الگوریتم با مقادیر مشاهداتی مطابقت دارند. مقدار بالایی از ضریب همبستگی نشان‌دهنده تطابق خوب بین مدل و مشاهدات است.

میانگین مطلق خطا (MAE): یکی دیگر از شاخص‌های معمول برای ارزیابی دقت مدل‌ها است. مقدار میانگین مطلق خطا که از اختلافات مطلق بین مقادیر پیش‌بینی شده و واقعی برای هر نمونه محاسبه می‌شود، معیاری خوب برای اندازه‌گیری دقت مدل است.

هرچه میانگین مطلق خطا کم‌تر باشد، مدل دقیق‌تر خواهد بود (جدول ۲).

برای محاسبه مقادیر این پارامترها از برنامه‌نویسی در سامانه گوگل کولب^۱ استفاده شده است.

جدول ۲- شاخص‌های آماری مورداستفاده در این پژوهش به منظور ارزیابی روش‌های مختلف تبخیر و تعرق.

Table 2. The Statistical indicators used in this research to assess the different methods of evapotranspiration.

مقدار مطلوب Perfect value	معادله Equations	پارامترهای آماری Statistic metrics
1	$CC = \frac{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (f_n - \bar{f})(r_n - \bar{r})}{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (f_n - \bar{f})^2} \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (r_n - \bar{r})^2}}$	ضریب همبستگی Correlation coefficient (CC)
0	$RBIAS = \frac{\sum_{n=1}^N (f_n - r_n)}{\sum_{n=1}^N r_n}$	بایاس نسبی Relative BIAS (RBIAS)
0	$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (f_n - r_n)^2}$	ریشه میانگین مربعات خطا Root Mean Squared Error (RMSE)
0	$MAE = \frac{\sum_{n=1}^N r_n - f_n }{n}$	میانگین مطلق خطا Mean Absolute Error (MAE)

که در آن، N تعداد داده‌ها، مقادیر r_n مقدار تبخیر و تعرق به روش استاندارد پنمن مونتیث فائو و f_n مقادیر محاسباتی تبخیر و تعرق با استفاده از الگوریتم سبال

نتایج و بحث

محاسبه شدند. جدول ۳ شاخص‌های آماری مقادیر محاسبه شده را نشان می‌دهد.

مقادیر تبخیر و تعرق گیاه مرجع به صورت روزانه برای منطقه مورد مطالعه در تاریخ‌های مورد نظر، با استفاده از روش پنمن مونتیث فائو و روش سبال

جدول ۳- پارامترهای آماری داده‌های محاسباتی تبخیر و تعرق به دو روش پنمن مونتیث فائو و روش سبال.

Table 3. Statistical parameters of reference crop evapotranspiration calculation data using two methods: FAO Penman Monteith, and Sebal method.

شاخص	تبخیر و تعرق پنمن مونتیث فائو	تبخیر و تعرق سبال
Index	ETo	ETsebal
Mean	7.485	4.128
Median	7.537	3.434
Std	3.846	2.248
Min	0.909	0.878
Max	14.786	14.810
Skewness	0.009	1.483
Q1	4.125	2.553
Q2	7.537	3.434
Q3	10.634	5.465

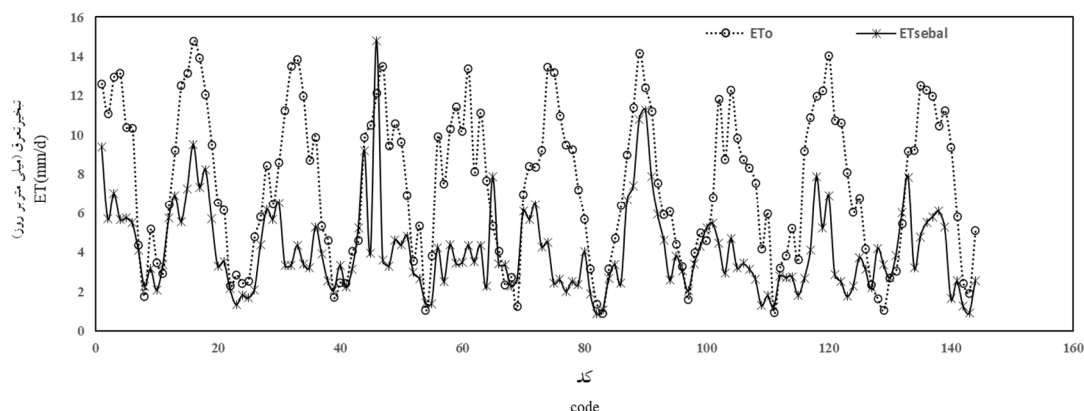
مونتیث فائو و روش سبال همبستگی ۰/۵۹ داشته، پارامتر ریشه میانگین مربعات خطا ۴/۵۶ میلی‌متر در روز و شاخص میانگین مطلق خطا ۳/۶۲ میلی‌متر در روز و بایاس نسبی ۰/۴۵- بوده است. سپس داده‌های مربوط به هر ماه جداگانه مورد بررسی و تجزیه و تحلیل آماری قرار گرفت. نتایج تجزیه و تحلیل آماری داده‌های تبخیر و تعرق روش پنمن مونتیث فائو و روش سبال در جدول ۴ نشان داده شده است. ضریب همبستگی بین دو روش در طول دوره آماری در محدوده ۰/۰۶ تا ۰/۷ قرار داشت. شاخص ریشه میانگین مربعات خطا در محدوده ۱/۱۴ تا ۷/۵۸ میلی‌متر در روز، شاخص میانگین مطلق خطا ۰/۸۴ تا ۷/۳۱ میلی‌متر در روز و شاخص بایاس نسبی در محدوده ۰/۰۳ تا ۰/۵۷- قرار گرفتند. پارامترهای آماری نشان دادند که تبخیر و تعرق روش پنمن مونتیث فائو و روش سبال در ماه‌های فصل بهار از همبستگی بالاتر و خطای کم‌تری برخوردار هستند، به طوری که بالاترین ضریب همبستگی این دو روش در ماه آوریل (فروردین ماه) با مقدار ۰/۷ مشاهده شد و میانگین مطلق خطا و شاخص ریشه میانگین مربعات خطا

نتایج آنالیزهای آماری داده‌های محاسباتی نشان می‌دهد که با توجه به مقادیر میانگین و میانه، داده‌های تبخیر و تعرق پنمن مونتیث فائو به طور متقارن توزیع شده‌اند، در حالی که داده‌های سبال دارای توزیعی نامتقارن و با انحراف به چپ هستند. این موضوع با تأیید نتایج چولگی همراه است. هم‌چنین، انحراف معیار داده‌ها نشان می‌دهد که داده‌های تبخیر و تعرق پنمن مونتیث فائو از پراکندگی بیش‌تری نسبت به داده‌های سبال برخوردارند. هم‌چنین، حداقل و حداکثر مقادیر داده‌ها در دو روش به یکدیگر نزدیک هستند.

مقایسه تبخیر و تعرق گیاه مرجع به روش پنمن مونتیث فائو و تبخیر و تعرق واقعی به روش سبال: نمودار مقادیر تبخیر و تعرق گیاه مرجع به روش پنمن مونتیث فائو و تبخیر و تعرق واقعی به روش سبال در تمام تاریخ‌های برداشت شده در شکل ۴ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، تبخیر و تعرق روش پنمن مونتیث فائو و روش سبال از روند مشابهی در طول دوره آماری برخوردار هستند. آنالیزهای آماری نشان داد که تبخیر و تعرق روش پنمن

باشد، هم‌چنین روش‌های مختلف برآورد تبخیر و تعرق مانند سبال و روش پنمن مونتیث فائو از فرمول‌های مختلفی برای برآورد تبخیر و تعرق استفاده می‌کنند که ممکن است این مدل‌ها در شرایط مختلف دقت‌های متفاوتی داشته باشند، به همین دلیل باید قبل از استفاده از این مدل‌ها در شرایط مختلف، در مقیاس‌های زمانی و مکانی اعتبارسنجی صورت پذیرد.

به ترتیب مقادیر $1/65$ و $1/45$ میلی‌متر در روز به دست آمد. آنالیزهای آماری نشان دادند که در ماه‌های فصل پاییز همبستگی قابل‌قبولی بین دو روش مورد مطالعه وجود ندارد. به طوری که پایین‌ترین ضریب همبستگی این دو روش در ماه اکتبر (مهرماه) با مقدار $0/06$ مشاهده شد. شرایط آب و هوایی فصلی مانند دما، باد و رطوبت می‌تواند بر دقت هر دو مدل تأثیرگذار



شکل ۴- نمودار مقادیر تبخیر و تعرق گیاه مرجع به روش پنمن مونتیث فائو و تبخیر و تعرق واقعی به روش سبال در طول دوره آماری.

Figure 4. Evapotranspiration values of reference crop evapotranspiration using FAO Penman-Mantith method and actual evapotranspiration using the Sabal method during the statistical period.

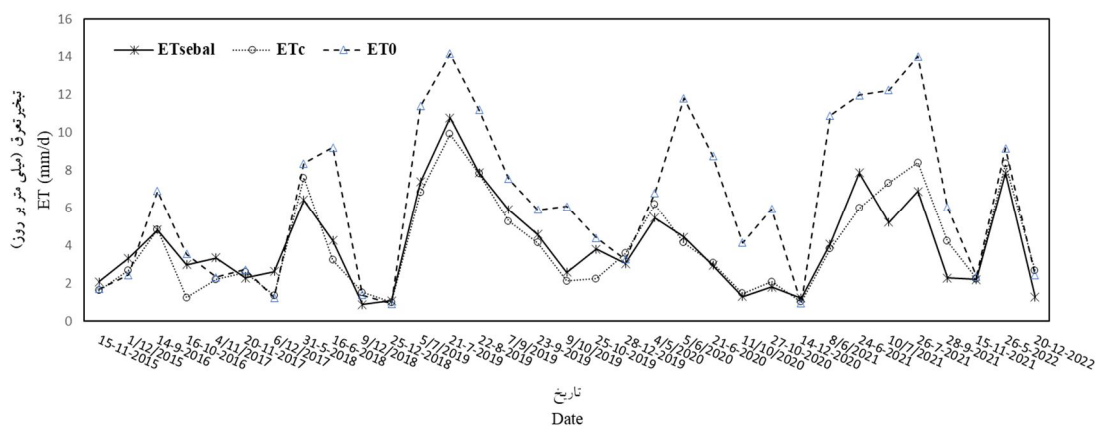
جدول ۴- پارامترهای آماری مقایسه تبخیر و تعرق گیاه مرجع به روش پنمن مونتیث فائو و تبخیر و تعرق واقعی به روش سبال.

Table 4. Statistical parameters of the comparison of reference crop evapotranspiration the FAO Penman-Mantith method and actual evapotranspiration by the Sabal method.

ماه	ضریب همبستگی	ریشه میانگین مربعات خطا	بایاس نسبی	میانگین مطلق خطا
Month	CC	RMSE	RBIAS	MAE
All data	0.59	4.56	-0.45	3.62
Jan	0.55	4.98	-0.47	4.14
Feb	0.47	1.15	-0.19	0.91
Mar	0.65	1.48	-0.20	1.26
Apr	0.70	1.65	-0.18	1.45
May	0.61	3.45	-0.33	2.90
Jun	0.38	6.15	-0.51	5.90
Jul	0.42	7.58	-0.57	7.31
Aug	0.61	6.01	-0.54	5.71
Sep	0.37	4.76	-0.54	4.44
Oct	-0.06	2.90	-0.38	2.31
Nov	0.30	1.14	0.03	0.84
Dec	0.13	1.26	0.19	1.01

و روش سبال به یکدیگر نزدیک بوده و این دو پارامتر از روند مشابهی برخوردار هستند. البته باید توجه داشت مقایسه تبخیر و تعرق پوشش گیاهی با روش استاندارد پنمن مونیتث فائو نمی‌تواند میزان خطا در تعیین تبخیر و تعرق واقعی با استفاده از الگوریتم سبال را نشان دهد زیرا برای به دست آوردن تبخیر و تعرق واقعی با رویکرد فائو علاوه بر در نظر گرفتن ضریب گیاهی باید ضریب تنش را هم در نظر گرفت (۲۵)؛ بنابراین در زمان‌هایی که منطقه مورد نظر تحت تنش خشکی قرار داشته باشند میزان تبخیر و تعرق این مناطق از شرایط استاندارد فاصله خواهد داشت و باعث افزایش خطا خواهد شد؛ اما مقادیر تبخیر و تعرق گیاه مرجع از مقادیر تبخیر و تعرق واقعی به روش سبال بیش‌تر می‌باشد چراکه در تبخیر و تعرق گیاه مرجع هیچ‌کدام از ضرایب گیاهی و ضرایب تنش اعمال نشده‌اند.

مقایسه تبخیر و تعرق پوشش گیاهی منطقه به روش پنمن مونیتث فائو (ETc) و تبخیر و تعرق واقعی به روش سبال: با استفاده از نقشه پوشش گیاهی منطقه مورد مطالعه و سالنامه‌های آماری اداره جهاد کشاورزی، تاریخ‌هایی از طول دوره آماری مورد مطالعه که منطقه تحت پوشش گیاهان زراعی قرار داشت (۳۳) تاریخ استخراج شدند. سپس با استفاده از سالنامه‌های آماری و نوع گیاه کشت‌شده در منطقه مشخص شد که در این بازه زمانی، عمدتاً گندم در منطقه کشت شده است. با استفاده از ضریب گیاهی گندم (۲۴)، میزان تبخیر-تعرق پوشش گیاهی برای منطقه محاسبه شد. سپس نتایج با مقادیر تبخیر و تعرق گیاه مرجع و تبخیر و تعرق به روش سبال مقایسه شد. در شکل ۵، مقادیر تبخیر و تعرق گیاه مرجع، تبخیر و تعرق پوشش گیاهی و روش سبال نمایش داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مقادیر تبخیر و تعرق پوشش گیاهی

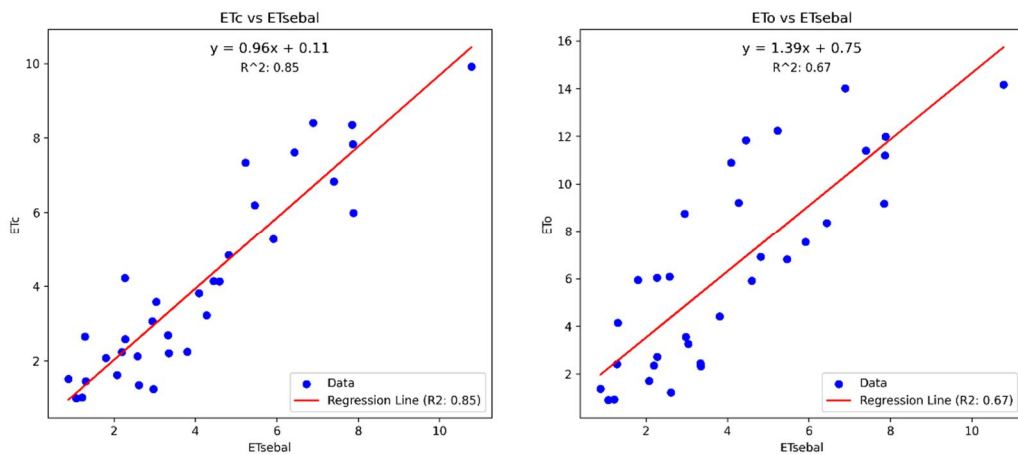


شکل ۵- نمودار مقادیر تبخیر و تعرق (گیاه مرجع، پوشش گیاهی) با تبخیر و تعرق واقعی به روش سبال.

Figure 5. The diagram of evapotranspiration method (ETo and ETc) with actual evapotranspiration by Sabal's method.

سبال در این نمودار هم پراکندگی کم‌تر و ضریب تعیین بالاتری را نسبت به روش تبخیر و تعرق گیاه مرجع نشان دادند.

در شکل ۶ نمودار پراکندگی و خط رگرسیون دو روش محاسبه تبخیر و تعرق پوشش گیاهی منطقه و گیاه مرجع با تبخیر و تعرق واقعی به روش سبال آورده شده است. تبخیر و تعرق پوشش گیاهی منطقه و روش

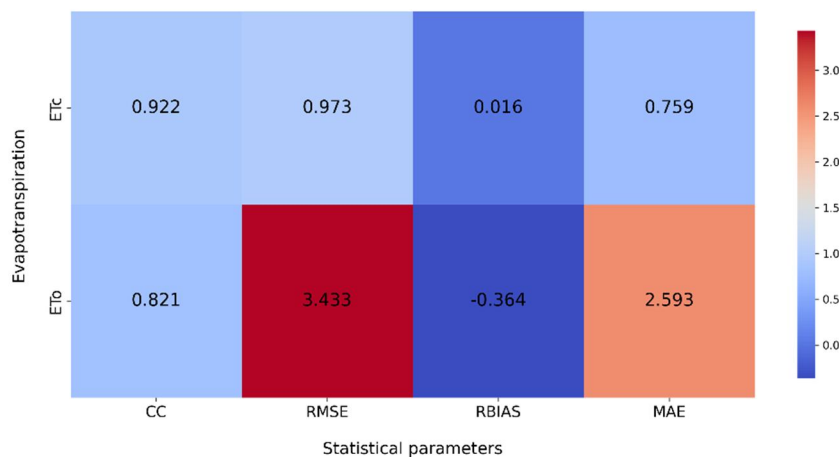


شکل ۶- نمودار پراکندگی و خط رگرسیون مقادیر تبخیر و تعرق پوشش گیاهی و تبخیر و تعرق گیاه مرجع به روش پنمن مونتیث فانو و روش تبخیر و تعرق واقعی با الگوریتم سبال.

Figure 6. Scatter plot and regression line of reference crop evapotranspiration and crop evapotranspiration by Fao-Penman-Monteth method and actual evapotranspiration method with Sabal algorithm.

مطلق خطا 0.76 میلی‌متر در روز و شاخص بایاس 0.16 ، توانست مقادیر تبخیر و تعرق پوشش گیاهی منطقه با دقت قابل‌قبولی تخمین بزند؛ اما دقت محاسبه تبخیر و تعرق پتانسیل گیاه مرجع کم‌تر به دست آمد.

مقادیر پارامترهای آماری مقایسه دو روش تبخیر و تعرق در شکل ۷ نشان داده شده است. با مقایسه پارامترهای آماری مشخص گردید که روش تبخیر و تعرق واقعی سبال با همبستگی 0.92 ، ریشه میانگین مربعات خطا 0.97 میلی‌متر در روز، میانگین



شکل ۷- نمودار Heatmap پارامترهای آماری مقایسه روش‌های تبخیر و تعرق (گیاه مرجع، پوشش گیاهی) با تبخیر و تعرق واقعی به روش سبال.

Figure 7. Heatmap plot of statistical parameters comparing evapotranspiration method (ETc and ETo) with actual evapotranspiration by Sabal's method.

نتیجه‌گیری کلی

افزایش دسترسی به داده‌های ماهواره‌ای و پیشرفت‌های جدید در تکنیک‌های سنجش‌ازدور، راه را برای دستگاه‌هایی هموار می‌کند که می‌توانند استفاده از آب توسط ذینفعان مختلف را نزدیک به زمان واقعی در مقیاس‌های مکانی مختلف مانیتور کنند. در این راستا، مدل‌های تخمین ET ماهواره‌ای مانند SEBAL می‌تواند مفید باشد. البته کارایی این مدل در اقلیم‌ها و محصولات مختلف متفاوت است. با توجه به نقشه‌های تبخیر و تعرق گیاهی که توسط این روش تولید می‌شود، مشخص می‌شود که میزان تبخیر و تعرق گیاهی در شرایط مختلف مزرعه متفاوت است و باید نیازهای آبیاری متفاوتی را برای هرگونه گیاه در نظر گرفت. با این حال، به دلیل وجود خطاهایی در جمع‌آوری داده‌های آب و هوایی، از جمله سرعت باد، دمای هوا، تابش خورشیدی، مدت روز، رطوبت هوا و عدم کالیبره نکردن ضرایبی مانند ضریب تشتک تبخیر و ضریب گیاهی برای هر منطقه، برآورد تبخیر و تعرق به روش‌های معمول همراه با خطای بسیاری است. در این مسیر، می‌توان از روش‌های جدیدی مانند استفاده از تصاویر ماهواره‌ای استفاده کرد و تبخیر- تعرق گیاه را برای مناطق مختلف به صورت گسترده و در مقیاس نقطه‌ای محاسبه کرد. روشن است که با استفاده از تصاویر با دقت مکانی مناسب و با پوشش گسترده، می‌توان به راحتی نقشه‌های واقعی تبخیر و تعرق گیاه برای هر منطقه و در طول فصل رشد ایجاد کرد. این امر به ما این امکان را می‌دهد که به راحتی آب مورد نیاز و مدیریت آبیاری اراضی را بهبود بخشیم؛ بنابراین هدف از این مطالعه بررسی کارایی الگوریتم SEBAL برای محصولات زراعی در منطقه تربت‌جام است. با توجه به نتایج پژوهش، مشاهده شد که روش سبال مقادیر واقعی تبخیر و تعرق را با نتایجی قابل قبول محاسبه می‌کند.

با توجه به نتایج این پژوهش، می‌توان بیان کرد که الگوریتم سبال در منطقه مورد مطالعه از توانایی بالایی در برآورد تبخیر- تعرق برخوردار است. این نتایج نشان می‌دهند که استفاده از سنجش‌ازدور یک روش کارآمد و مؤثر برای تخمین تبخیر و تعرق در مقیاس‌های بزرگ است، به ویژه در مناطقی که داده‌های هواشناسی در دسترس نیست. قمرنیا و رضوانی (۲۰۱۵) در منطقه دشت بيله سوار در غرب ایران نیز همبستگی بالایی (۰/۸۳) بین دو روش تبخیر و تعرق گندم و تبخیر و تعرق واقعی سبال به دست آوردند (۲۶). قادری و همکاران (۲۰۲۰) نیز با مقایسه روش سبال و تبخیر و تعرق گیاه مرجع در مزارع گندم دشت ایلام نتایج مشابه و قابل قبولی به دست آوردند (۲۷). رحیمی و همکاران (۲۰۱۵) نیز با مقایسه مقادیر محاسبه شده تبخیر و تعرق به روش پنمن موتیث فائو در حوضه آبریز تجن و منطقه شرکت کشاورزی ساری دشت ناز و روش سبال نتایج قابل قبولی در تخمین تبخیر و تعرق ساعتی و روزانه به دست آوردند (۱۳). مرشدی و همکاران (۲۰۰۲) نیز در پژوهش‌های خود در دو منطقه تبریز و کرج با مقایسه تبخیر و تعرق سبال با داده‌های لایسیمتر در مزرعه گندم به این نتیجه رسیدند که الگوریتم سبال با دقت قابل قبولی تبخیر و تعرق گندم را محاسبه می‌نماید در مطالعه آن‌ها مقادیر تبخیر و تعرق محاسبه شده توسط سبال بیش‌تر از تبخیر و تعرق اندازه‌گیری شده توسط لایسیمتر بود (۱۴). اوجن و یاکی (۲۰۲۲) نیز در دریاچه Yenicaga در بولو، ترکیه ارتباط قوی بین مدل سبال و داده‌های زمینی پیدا کردند در مطالعه آنان نیز مدل سبال تبخیر و تعرق روزانه را بیش برآورد نمود (۶). شاملو و همکاران (۲۰۲۱) در ترکیه و درو (۲۰۲۳) در هند نیز نشان دادند که مقادیر تبخیر و تعرق تولید شده SEBAL با روش فائو پنمن موتیث مطابقت بالایی دارد (۷، ۸).

است. این داده‌ها با مکاتبه با نویسنده مسئول قابل دسترسی می‌باشند.

تعارض منافع

در این مقاله تعارض منافی وجود ندارد و این مسأله مورد تأیید همه نویسندگان است.

مشارکت نویسندگان

مراحل مختلف این مطالعه مانند دسترسی به داده‌ها و داده‌برداری، آماده‌سازی داده‌ها، آنالیزها، طرح تحقیق و روش‌شناسی، اصلاح و نهایی‌سازی مقاله توسط نویسنده اول این مقاله انجام شده است.

اصول اخلاقی

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این اثر عملی رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تأیید همه آن‌ها می‌باشد.

حمایت مالی

حمایت مالی از این پژوهش در قالب گرنت پژوهشی نویسنده اول این مطالعه بوده است.

این نتایج نشان می‌دهد که استفاده از این روش می‌تواند در منطقه مورد مطالعه مناسب باشد. به طور خلاصه، یافته‌ها نشان می‌دهد که الگوریتم SEBAL یک رویکرد مناسب برای تخمین تبخیر و تعرق محصول است و می‌تواند به عنوان یک ابزار مؤثر برای مدیریت منابع آب در مزارع و سایر زمینه‌های مشابه عمل کند. استفاده از این تکنیک نه تنها به حفظ منابع آب کمک می‌کند، بلکه مصرف آب را در دوره‌های کم تقاضا به حداقل می‌رساند.

تقدیر و تشکر

نویسندگان مقاله مراتب سپاس و قدردانی خود را از اداره هواشناسی شهرستان تربت‌جام در مساعدت در تهیه داده‌های هواشناسی و مجتمع آموزش عالی تربت‌جام به علت حمایت مالی ایشان در انجام این پژوهش بیان می‌دارند.

داده‌ها، اطلاعات و دسترسی

داده‌های این پژوهش از اداره هواشناسی شهرستان تربت‌جام اخذ شده است. داده‌های ماهواره‌ای این پژوهش از سامانه گوگل ارث‌انجین دریافت شده

منابع

- Noori, R., Maghrebi, M., Jessen, S., Bateni, S. M., Heggy, E., Javadi, S., Noury, M., Pistre, S., Abolfathi, S., & AghaKouchak, A. (2023). Decline in Iran's groundwater recharge. *Nature Communications*, 14 (1), 6674. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-42411-2>.
- Monteith, J. L. (1965). Evaporation and environment. *Symposia of the Society for Experimental Biology*, 19, 205-234.
- Allen, R. G., Tasumi, M., & Trezza, R. (2007). Satellite-Based Energy Balance for Mapping Evapotranspiration with Internalized Calibration (METRIC)-Model. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 133 (4), 380-394. <https://doi.org/10.1061>.
- Zamani Losgedaragh, S., & Rahimzadegan, M. (2018). Evaluation of SEBS, SEBAL, and METRIC models in estimation of the evaporation from the freshwater lakes (Case study: Amirkabir dam, Iran). *Journal of Hydrology*, 561, 523-531. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.04.025>.
- Rawat, K. S., Bala, A., Singh, S. K., & Pal, R. K. (2017). Quantification of wheat crop evapotranspiration and mapping: A case study from Bhiwani District of Haryana, India. *Agricultural Water Management*, 187, 200-209. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2017.03.015>.

6. Evcen, A., & Yağcı, A. L. (2022). Gerçek Evapotranspirasyonun Landsat Uydu Görüntüleri Kullanarak SEBAL Modeli ile Hesaplanması: Bolu/Yeniçağa Örneği. *Turkish Journal of Remote Sensing and GIS*, 3 (2), 172-182. <https://doi.org/10.48123/rsgis.1126221>.
7. Shamloo, N., Taghi Sattari, M., Apaydin, H., Valizadeh Kamran, K., & Prasad, R. (2021). Evapotranspiration estimation using SEBAL algorithm integrated with remote sensing and experimental methods. *International Journal of Digital Earth*, 14 (11), 1638–1658. <https://doi.org/10.1080/17538947.2021.1962996>.
8. Dhruw, M., Pandey, V. K., & Verma, S. (2023). Actual Crop Evapotranspiration Estimation of Wheat Crop Using SEBAL Algorithm and Remotely Sensed Data. *Current Journal of Applied Science and Technology*, 42 (20), 15-25. <https://doi.org/10.9734/cjast/2023/v42i204150>.
9. Vicente Liendro Moncada, J., José Araújo da Silva, T., José, J. V., Bonfim-Silva, E. M., Fenner, W., & Oliveira, N. P. R. de. (2022). Evapotranspiration mapping of cotton fields in Brazil: Comparison between SEBAL and FAO-56 method. *Geocarto International*, 37 (17), 5133-5149. <https://doi.org/10.1080/10106049.2021.1920633>.
10. Nosrati, K., Mohseni Saravi, M., Ahmadi, H., & Aghighi, H. (2015). Evapo-transpiration estimation in Taleghan Drainage Basin using MODIS images and SEBAL model. *Journal of Range and Watershed Management*, 68 (2), 385-398. <https://doi.org/10.22059/jrwm.2015.54937>.
11. Karbasi, M., Moghadam, M., Nikbakht, J., & Kaviani, A. (2016). Estimation of crop actual evapotranspiration using SEBAL algorithm (Case study: Khoramdareh region at Zanjan province). *Iranian Journal of Ecohydrology*, 3 (3), 427-437. <https://doi.org/10.22059/ije.2016.60031>.
12. Goshehgir, A. S., Golabi, M., & Naseri, A. A. (2018). Comparison of actual evapotranspiration estimated using gram-schmidt method and SEBAL algorithm with lysimetric data (Case study; Amir Kabir Sugarcane Argo-Industry). *Iran-Water Resources Research*, 14 (1), 125-139.
13. Rahimi, S., Gholami Sefidkouhi, M. A., Raeini-Sarjaz, M., & Valipour, M. (2015). Estimation of actual evapotranspiration by using MODIS images (a case study: Tajan catchment). *Archives of Agronomy and Soil Science*, 61 (5), 695-709. <https://doi.org/10.1080/03650340.2014.944904>.
14. Morshedi, A., Jafari, H., & Onabi Milani, A. (2022). Estimation of Actual Evapotranspiration of Wheat Using SEBAL Algorithm Compared to Lysimetric Results under Standard Conditions in Tabriz and Karaj Research Stations. *Journal of Water Research in Agriculture*, 36 (1), 21-33. <https://doi.org/10.22092/jwra.2022.356223.896>.
15. Kamyab, A. D., Mokhtari, S., & Jafarinia, R. (2022). A comparative study in quantification of maize evapotranspiration for Iranian maize farm using SEBAL and METRIC-1 EEFLux algorithms. *Acta Geophysica*, 70 (1), 319-332. <https://doi.org/10.1007/s11600-021-00704-4>.
16. Yagci, A. L., & Santanello, J. A. (2018). Estimating Evapotranspiration From Satellite Using Easily Obtainable Variables: A case study over the Southern Great Plains, U. S. A. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 11 (1), 12-23. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2017.2753723>.
17. Li, Z. L., Tang, R., Wan, Z., Bi, Y., Zhou, C., Tang, B., Yan, G., & Zhang, X. (2009). A review of current methodologies for regional evapotranspiration estimation from remotely sensed data. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 9 (5), 3801-3853. <https://doi.org/10.3390/s90503801>.
18. Mohan, M. M. P., Kanchirapuzha, R., & Varma, M. R. R. (2020). Review of approaches for the estimation of sensible heat flux in remote sensing-based evapotranspiration models. *Journal of Applied Remote Sensing*, 14 (4), 041501. <https://doi.org/10.1117/1.JRS.14.041501>.

19. Bastiaanssen, W. G. M., Noordman, E. J. M., Pelgrum, H., Davids, G., Thoreson, B. P., & Allen, R. G. (2005). SEBAL Model with Remotely Sensed Data to Improve Water-Resources Management under Actual Field Conditions. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 131 (1), 85-93. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(2005\)131:1\(85\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2005)131:1(85)).
20. French, A. N., Hunsaker, D. J., Sanchez, C. A., Saber, M., Gonzalez, J. R., & Anderson, R. (2020). Satellite-based NDVI crop coefficients and evapotranspiration with eddy covariance validation for multiple durum wheat fields in the US Southwest. *Agricultural Water Management*, 239, 106266. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106266>.
21. Allen, R., Pereira, L., Raes, D., & Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration guidelines for computing crop requirements. FAO Irrig. Drain. Report modeling and application. *J. Hydrol.* 285, 19-40.
22. Bastiaanssen, W. G. M. (2000). SEBAL-based sensible and latent heat fluxes in the irrigated Gediz Basin, Turkey. *Journal of Hydrology*, 229 (1), 87-100. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(99\)00202-4](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(99)00202-4).
23. Allen, R., Tasumi, M., Trezza, R., Bastiaanssen, W., & Waters, R. (2002). Surface Energy Balance Algorithms for Land. Advanced Training and User's Manual-Idaho Implementation, Version 1.0, 97p.
24. Ghaemi, M., Raeini Sarjaz, M., & Mosavi, M. (2013). Estimating the crop coefficient and the water requirement of the Gasconne wheat by using energy balance method in Mashhad. *Irrigation and Water Engineering*, 3 (3), 58-68.
25. Zare khormizi, H., Tavili, A., & Ghafarian Malamiri, H. R. (2021). Estimation of Actual Evapotranspiration Using SEBAL Algorithm and Comparison with Improved FAO 56 Standard Evapotranspiration with KC-NDVI Relationship. *Iranian Journal of Remote Sensing & GIS*, 13 (3), 73-92. <https://doi.org/10.52547/gisj.13.3.73>. [In Persian]
26. Ghamarnia, H., & Rezvani, V. (2015). An Estimation of Evapotranspiration Using SEBAL Method and its Comparison with Penman-Montieth A Case Study of Bilevar Plain, Western Iran. *International Journal of Water Resources Development*, Vol. (III)-No. (01), 16-31.
27. Ghaderi, A., Dasineh, M., Shokri, M., & Abraham, J. (2020). Estimation of actual evapotranspiration using the remote sensing method and SEBAL algorithm: A case study in Ein Khosh Plain, Iran. *Hydrology*, 7 (2), 36.

